

## Las bóvedas gausas

Robert Brufau



*La primera cáscara de ladrillo que construimos, hace más de treinta años, era una lámina cilíndrica que descargaba en vigas de hormigón; los empujes se resistían con tensores de hierro común. Ya entonces vimos algunos hechos esenciales que formaron una imagen que fue el hilo conductor de la evolución de una técnica y una forma, cuyo resultado final son las bóvedas gausas.*

similar papers at [core.ac.uk](http://core.ac.uk)

provided by



La bóveda gausa es, ciertamente, una pieza de notable singularidad dentro del conjunto de tipologías laminares de la segunda mitad del siglo XX. La utilización de la cerámica armada, por un lado, y la original rectificación de la geometría de la sección transversal de la clásica bóveda autoportante con ondulación constante, por el otro, convierten esta solución constructiva “en diente de sierra” en un modelo cuyo interés analítico sobrepasa largamente el que se ceñiría a un momento determinado y a un ámbito territorial concreto.

Las fundamentos básicos de la razón de ser estructural de la forma de las bóvedas gausas<sup>1</sup> se pueden establecer a partir de las siguientes consideraciones:

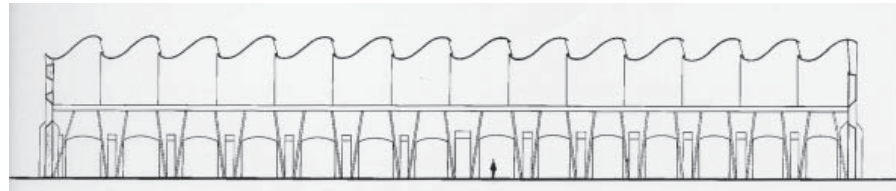
- Las directrices de la arista anterior y de la posterior de la bóveda, así como el trazado de su cumbrera, deben adaptarse a la geometría de una catenaria invertida, mientras que las secciones

transversales han de ondularse, aumentando en mayor proporción su rigidez que su superficie y su peso. De esta manera el peso propio de la bóveda no provoca tensiones de tracción al no producirse momentos flectores en ninguna sección, generándose únicamente tensiones normales de compresión, independientes del área de la sección y tanto mayores cuanto mayor sea la luz a salvar y cuanto menor sea su flecha central<sup>2</sup>. En el supuesto de tener un trazado arquitectónico razonable, estas tensiones de compresión serán siempre asumibles por el conjunto ladrillo-mortero-acero, que se comportará como una unidad estructural con compatibilidad de trabajo entre sus tres componentes.

- La necesidad de armar estas bóvedas<sup>3</sup> responde a dos exigencias. La primera de ellas es la necesaria respuesta a la posible aparición de pequeñas tensiones de tracción como consecuencia de los momentos flectores que puedan generar las acciones eólicas y las sobrecargas añadidas. La segunda es consecuencia del propio diseño de la bóveda, ya que al tener diferente flecha las sucesivas catenarias longitudinales, su estado tensional también será distinto y, en consecuencia, también su alargamiento elástico. El armado actúa, ante este fenómeno, como el elemento vinculador que evita la fisuración transversal que invalidaría el monolitismo de la lámina, evitando de este modo que se pierda la inestimable ventaja de la rigidez que la doble curvatura confiere a la bóveda gausa.

- El riesgo de pandeo suele ser siempre el principal problema de los elementos laminares comprimidos de pequeño espesor. Habitualmente se resuelve acoplando a la bóveda arcos de rigidez por encima o por debajo, pero este recurso crea discontinuidades bruscas de sección que afectan su comportamiento elástico y pueden generar fisuración en las líneas transversales de contacto, al

2



3



Depósito Julio Herrera y Obes. Montevideo. Uruguay. 1979

1. Prueba de carga con la totalidad de los obreros y al fondo el propio ingeniero Dieste
2. Sección longitudinal por la clave de las bóvedas
3. Vista general de la cubierta del edificio
4. Vista general del edificio
5. Construcción del encofrado móvil de las bóvedas





tiempo que se complica en exceso su proceso constructivo. La forma de la bóveda gausa posibilita aumentar la rigidez de la lámina al introducir en ella una cierta y cambiante ondulación longitudinal, con lo que crece mucho más rápidamente su rigidez que su superficie y su peso y, por tanto, que sus tensiones compresivas debidas al peso propio. A esta mejora conceptual hay que añadir la ventaja de no tener discontinuidades en la sección transversal.

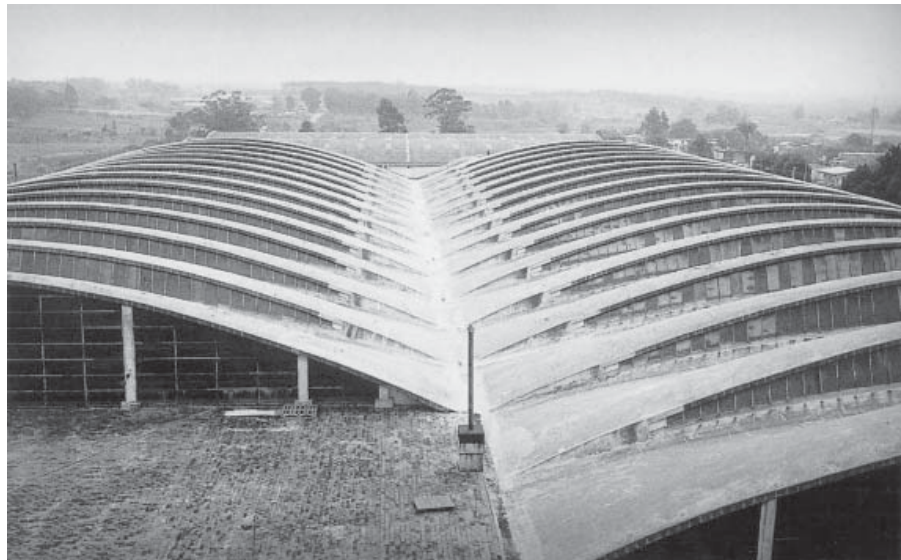
- Para evitar complejos sistemas de descarga en los extremos, se propone una corrección de la amplitud de onda de la bóveda, desde un máximo en la clave hasta un mínimo en sus dos arranques, de manera que la bóveda gausa tenga, al llegar a éstos, una línea recta como límite, posibilitando así una entrega fácil en los muros o en las vigas receptores.

- El aspecto constructivo de estas bóvedas ofrece asimismo algunas ventajas con respecto a las bóvedas convencionales. En efecto, los estudios de Dieste permiten limitar su tiempo de cimbrado a una simple cuestión de horas: 3 para bóvedas de 15 m de luz, y 14 si la luz es de 50 m. Basa estos datos en las experiencias reales vividas y los fundamenta en el hecho de que la forma de la bóveda y su doble curvatura permiten augurar la ausencia de pandeo inicial, siempre dando por sentado que las dovelas cerámicas tienen suficiente resistencia a compresión una vez ensambladas por el mortero, aunque éste no haya alcanzado aún una gran resistencia. Bastaría verificar que los elementos receptores estuvieran ya en condiciones de recibir los empujes transmitidos por la bóveda, para iniciar su descimbrado. Con un único molde, de fácil descimbrado y transporte, se podría construir una ilimitada nave con una aceptable rapidez.

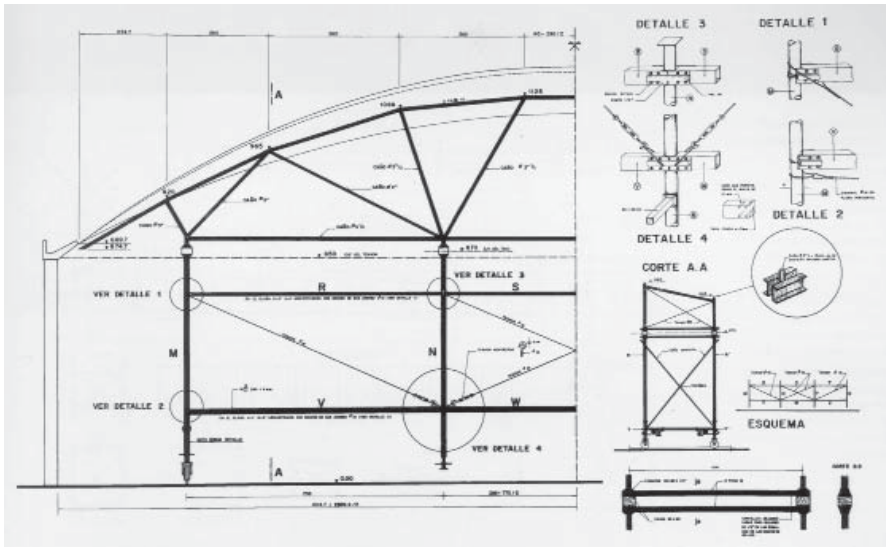
Las primeras bóvedas gausas proyectadas por Dieste son posteriores al

año 1960. Al tratarse de una solución estructural basada en métodos constructivos aparentemente tradicionales, intenté hallar algún precedente histórico que abriera el camino hacia la solución concreta de Dieste. Después de analizar cubiertas con tipologías similares, tras consultar diversos tratados al respecto, encontré una solución de apariencia similar construida en 1956 para la cubrición de unos talleres de la Compañía de Ferrocarriles de Bulgaria, según un proyecto de Ilia Doganoff. La unidad básica, de  $18 \times 7 \text{ m}^2$ , no era exactamente una bóveda gausa como la define Dieste, ya que su geometría se asemejaba más a un conoide, obtenido por traslación de un arco cuya extremidad inferior corta una recta horizontal donde se dispone el canalón de recogida de aguas, mientras que la superior se desplaza sobre el arco que define el borde de remate de las ventanas del diente de sierra. Si bien este proyecto recuerda algunos de los principios básicos de la teoría de Dieste, como son el aprovechamiento de las ventajas estructurales de la doble curvatura, la consecución de una simplificación geométrica con eliminación de curvatura en alguno de los bordes, y la posibilidad de iluminación lateral en diente de sierra, algunas son las diferencias. En efecto, Doganoff no utilizó la cerámica<sup>4</sup> como elemento portante principal, ya que la resistencia la confiaba básicamente al propio hormigón; tampoco consiguió una entrega recta en los bordes laterales, sino en el frontal inferior; finalmente, aún contando con luces sensiblemente inferiores (18 m) a las que habitualmente conducen a Dieste al empleo de esta tipología, para evitarse un cimbrado costoso recurrió a la prefabricación de cada bóveda en 4 fragmentos de  $4,50 \times 7 \text{ m}^2$ , lo que exigía complejas operaciones de ensamblaje para lograr en obra la continuidad de la lámina. La lejanía de este proyecto y su presumible escasa difusión internacional, sumado a las mu-

6. Visión superior de la nave de reparación de los ferrocarriles búlgaros, conoide proyectado por Ilia Doganoff en 1956, que podría ser un precedente próximo de las bóvedas gausas
7. Una de las primeras bóvedas gausas proyectadas por Dieste en 1962 con una luz de 43 m, para la factoría TEM en Montevideo







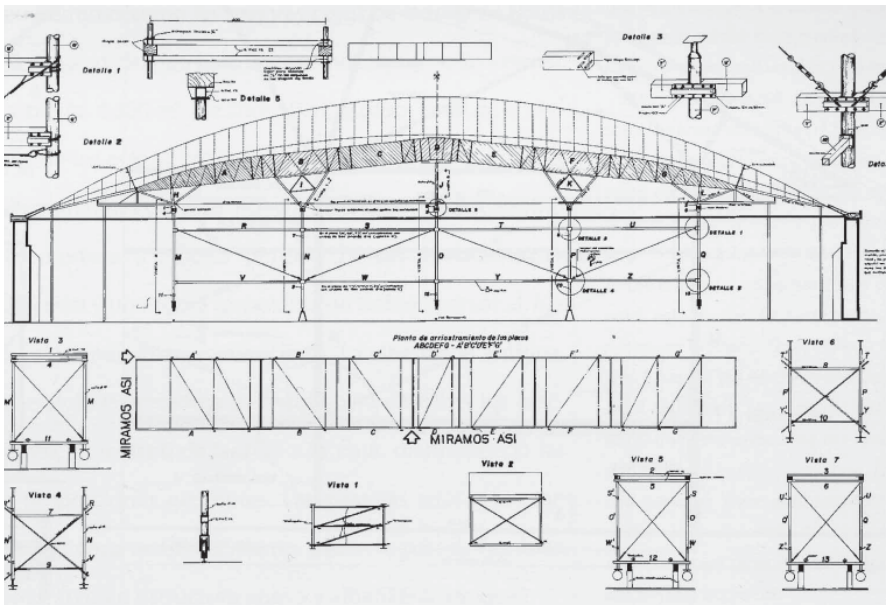
8

chas diferencias constatadas, permiten suponer que Dieste nunca la utilizó como referencia inmediata (5).

En mi opinión, la invención de la bóveda gausa representa la mayor aportación de su autor a la recuperación de una técnica edificatoria que a mediados de este siglo se creía totalmente superada. En efecto, la utilización de las grandes láminas cerámicas, trabajando estructuralmente más por su forma que por el momento de inercia de sus secciones, parecía un sistema constructivo que, correctamente entendido a principios de siglo por algunos arquitectos del Modernismo catalán -Gaudí, Puig i Cadafalch, Muncunill, etc.- se hubiera agotado con las últimas construcciones de Guastavino en los Estados Unidos, para dar paso a la utilización de soluciones con un mismo principio en lo concierne al trabajo por la forma, pero sustituyendo la cerámica por el hormigón armado. Dieste manifestaba, en sus escritos, su convencimiento de que la cerámica estructural podría recuperar un campo de actuación específico cuando, gracias a la introducción de armaduras, hiciera posibles opciones estructurales similares a las que ofrece un material más moldeable, como es el hormigón, pero enfrentando a éste una mayor facilidad del proceso de cimbrado y un mejor comportamiento acústico y térmico.

Uno de los aspectos innovadores de esta solución es la alternativa de forzar la geometría de la sección transversal de la bóveda, que en el límite podría acabar con una línea recta en sus dos arranques. Ello posibilitaría una evidente simplificación de los elementos receptores, que podrían resolverse con muros o vigas de poco espesor en planta. Esta opción llevaría implícita una cierta dificultad para controlar la componente horizontal de los empujes, lo que podría exigir, en el supuesto de hacer un planteamiento isostático, la disposición de atirantamientos horizontales longitudinales,

9



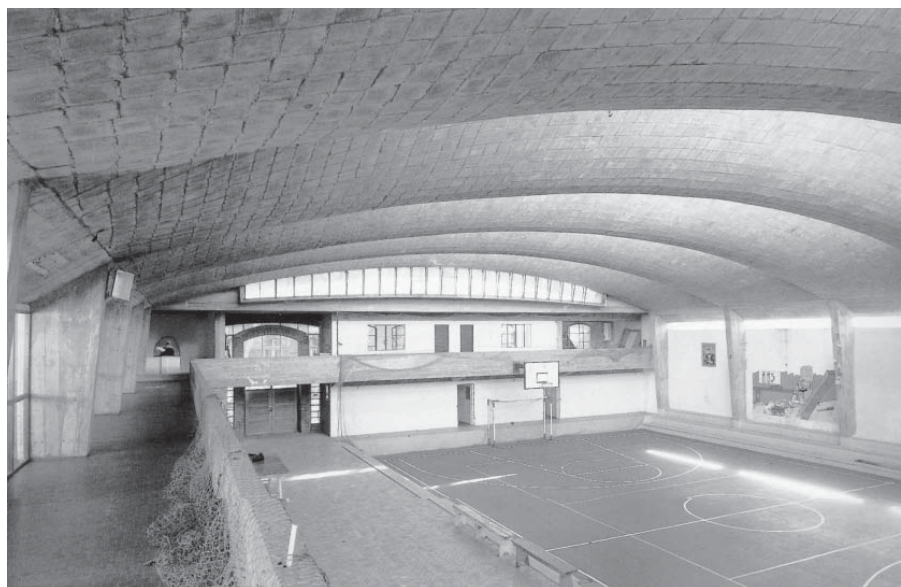
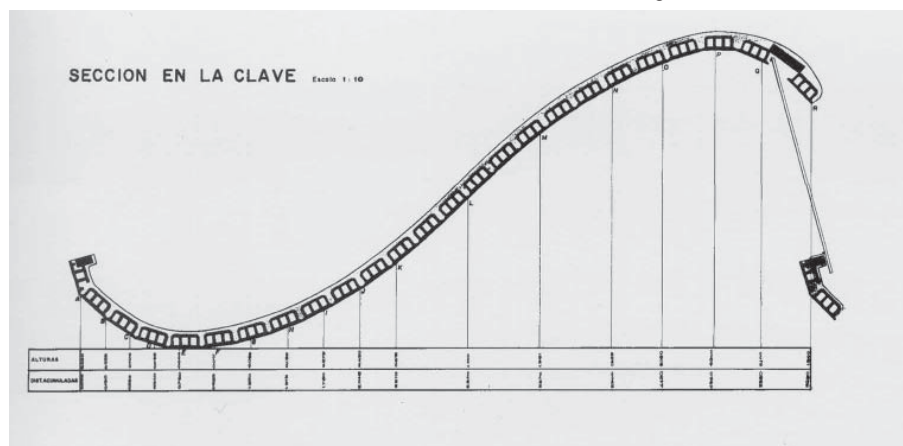
y, en el supuesto contrario, la disposición de elementos receptores suficientemente estables y capacitados, por su masa y por su inercia, para soportar tales empujes. Sorprende, no obstante, la escasa importancia que Dieste parece dar al hecho de tener atirantadas, o no, las bóvedas. Utiliza indistintamente ambas soluciones, incluso para resolver situaciones similares. En efecto, mientras la cubrición del Gimnasio de Durazno (1974) no presenta tirantes, en el Gimnasio de Montevideo (1983) ocurre lo contrario, aun siendo ésta una estructura cronológicamente posterior y con menor distancia entre arranques. Hay que hacer notar que Dieste las cualifica como *“un mismo sistema estructural para salvar diferentes luces”*. No deja de ser curiosa esta no diferenciación, si se tiene en cuenta el resultado arquitectónico radicalmente distinto que implica tener virtualmente partido el espacio, o no, por la presencia de las barras de arriostramiento. Una de las más hermosas estructuras de Dieste realizada con esta tipología es el Silo horizontal de Young, en Río Negro 10 (1978), donde cubría una luz de unos 30 m sin atirantamiento alguno. Aquí la presencia de los tensores horizontales hubiera sido incompatible con la posibilidad de almacenar el material, y Dieste la evitó, resolviendo el problema de los empujes en el arranque de una manera muy simple, con una adecuada disposición del pilotaje.

Quizás sean, en último término, las propias reflexiones de Eladio Dieste las que den sentido a operaciones de recuperación tipológica como las que conducen al diseño de las bóvedas gausas. Estas son sus palabras: *“...Más de una vez me he encontrado con una sorpresa, entre incrédula y divertida, acerca del hecho de que hayamos construido grandes estructuras laminares de ladrillo, como pareciendo suponer que se trata de una manía personal, intransferible y perecedera, por la supuesta complejidad*

8 y 9. En la cubierta de los depósitos portuarios de Montevideo, Dieste perfecciona la geometría de las bóvedas, alcanzando luces próximas a los 50 m, con una lámina de 10+2 cm de espesor

10. Sección por la clave de la bóveda gausa. Esquema y replanteo del encofrado de la misma

11. Estructura de bóvedas gausas no atirantadas, de 45 m de luz, para la cubrición de un gimnasio en Durazno, 1974





12

*de las técnicas y los métodos de cálculo empleados, y por el hecho de que la inevitable evolución hacia una civilización industrial de alta tecnología barrerá con los vestigios de técnicas que se suponen superadas... Sería tonto negar que detrás de cada solución hay una ingente suma de trabajo técnico, pero no es el que se supone sino otro, a la vez más difícil y más fácil, en el que la forma pensada, los métodos de cálculo, la técnica de ejecución y el diseño de los equipos necesarios, están íntimamente relacionados, requiriendo todo el proceso, más que una gran complejidad analítica, una especie de fidelidad vigilante a los fundamentos de la mecánica teórica y de la resistencia de materiales...”.*

Notas:



13

*Robert Brufau i Niubó, Doctor Arquitecto, es Presidente de la Asociación de Consultores de Estructuras de Cataluña (1989-1997) y Profesor Titular del Departamento de Estructuras de la U.P.C.*



<sup>1</sup> La descripción de las características principales de esta solución estructural, expresada con la precisión que se deriva de una profunda reflexión sobre la construcción y la lógica estructural, la da Dieste en las primeras líneas del capítulo *Bóvedas gausas*, que forma parte del texto que acompaña la exposición itinerante presentada en Montevideo (1996) y en Sevilla (1997).

<sup>2</sup> Según datos del propio Dieste, una bóveda de 100 m de luz y 10 m de flecha, con trazado catenárico, generaría, por peso propio, únicamente una tensión de compresión de 27 Kg/cm<sup>2</sup>.

<sup>3</sup> El armado longitudinal se dispone entre dos hileras consecutivas de bovedillas o ladrillos cerámicos, tanto en dirección longitudinal como transversalmente cada cierto número de piezas, por lo que es preciso "tapar" algunos huecos de la bovedilla cerámica para asegurar un buen recubrimiento de las varillas con mortero. Finalmente se debe disponer un fino mallazo en su cara superior amorturada.

<sup>4</sup> En el proyecto de Doganoff se disponían, como aligeramiento, piezas de hormigón poroso aislantes, aunque con una irrelevante función resistente, que eran envueltas con finas capas de hormigón armado. Aunque Dieste admite que las piezas embebidas de la bóveda gausa pueden, en efecto, ser de hormigón, normal o poroso, recomienda como material idóneo la cerámica, y le asigna una evidente colaboración en la resistencia del conjunto.

<sup>5</sup> Dieste reconoce, en alguno de sus escritos recientes, la similitud de sus bóvedas gausas con los conoides en diente de sierra, pero hace hincapié en la diferencia de luces que cada uno de los sistemas puede admitir con una inversión económica similar. En efecto, a coste parecido, las bóvedas gausas pueden alcanzar, sin excesivos problemas, luces de hasta 60 m, mientras que los conoides difícilmente superarían los 20 o 25 m.

12,13 y 14. Vistas del espacio interior de la nave del Depósito Julio Herrera, con las bóvedas de doble curvatura

